近 20 年广西北部湾典型入海河流河口要素时空分异特征分析

张六一[1]，叶清纯[2]，黎树式[2,3,4]，许珊珊[5]，王梦竹[1]

（1. 北部湾大学海洋学院 钦州 535011；2. 北部湾大学资源与环境学院 钦州 535011；
3. 广西北部湾海洋环境变化与灾害研究重点实验室 钦州 535011；
4. 平陆运河河口海湾生态系统广西野外科学观测研究站 钦州 535000；5. 南宁市天桃实验中学 南宁 530022）

摘要：河口要素时空分异是海岸带综合管理研究的重要内容。文章基于多年遥感影像数据和经济社会数据，研究广西北部湾入海河流河口要素的时空分异特征，结果表明：（1）自然要素空间分异显著，东部南流江展宽系数达 8.99 km，年均径流量为 5.18×10^9 m^3，呈现“高径流—低含沙”特征；西部北仑河分汊系数为 7，沉积类型复杂。（2）人类活动驱动下土地利用呈“水域缩减—建设扩张”模式，钦州湾建设用地扩张了 112%，农田面积减少超过 55%；同时，区域经济发展分异明显，港口区经济总量持续领先，而东兴市受边境贸易与疫情影响，2017—2020 年出现阶段性衰退。（3）自然灾害东—西分异明显，东部以洪涝为主，2020 年钦江洪灾致 1.2 万 hm^2 农田受淹；西部多风暴潮与山洪链式灾害。海平面上升与极端气候事件加剧了灾害风险。基于上述特征，提出旅游休闲型、航运贸易型与生态保护型三类河口的差异化治理路径，为海岸带综合管理、防灾减灾与生态保护提供科学依据。

关键词：时空分异；分汊系数；入海河流河口；海岸带管理；广西北部湾

中图分类号：X17；P941.8；P7 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-9857（2025）12-0102-11

Spatiotemporal Dynamics of Estuarine Elements in Typical Estuaries of Rivers Flowing into the Beibu Gulf，Guangxi，Over the Past Two Decades

ZHANG Liuyi[1]，YE Qingchun[2]，LI Shushi[2,3,4]，XU Shanshan[5]，WANG Mengzhu[1]

（1. College of Marine Science，Beibu Gulf University，Qinzhou 535011，China；
2. College of Resources and Environment，Beibu Gulf University，Qinzhou 535011，China.
3. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Disaster Processes and Protection Technology，Beibu Gulf，Qinzhou 535011，China；4. Guangxi Field Scientific Observation and Research Station of Estuarine Bay Ecosystem of Pinglu Canal，Qinzhou 535000，China；5. Tiantao Experimental Middle School，Nanning 530022，China）

收稿日期：2025-04-07；**修订日期：**2025-12-23

基金项目：国家自然科学基金“北部湾南流江三角洲潮滩响应热带气旋的动力地貌过程”（42366008）；广西自然科学基金“平陆运河建设背景下钦江河口成潮入侵变化及其机制研究”（2025GXNSFHA069274）；2023 年广西壮族自治区级大学生创新创业训练计划项目“北部湾主要入海河流河口特征及可持续利用”（S202311607226）；2025 年广西壮族自治区级大学生创新创业训练计划项目“平陆运河建设背景下沙井港人工海滩养护研究”（S202511607209）.

作者简介：张六一，研究方向为流域—河口陆海相互作用

通信作者：黎树式，教授、硕士生导师，博士，研究方向为流域—河口陆海相互作用、海岸带综合管理

Abstract: The spatiotemporal differentiation of estuarine elements is an important aspect of integrated coastal zone management research. Based on many years of remote sensing imagery and socio-economic data, this study examines the spatiotemporal differentiation characteristics of estuarine elements in rivers flowing into the Beibu Gulf of Guangxi. The results indicate that: (1) The spatial differentiation of natural elements is significant. In the eastern region, the Nanliu River has a widening coefficient of 8.99 km and an average annual runoff of 5.18×10^9 m^3, showing the feature of "high runoff-low sediment concentration"; in the western region, the Beilun River has a branching coefficient of 7, with complex sediment types; (2) Driven by human activities, land use shows a pattern of "reduced water area–expanded construction land". Construction land in Qinzhou Bay expanded by 112%, while farmland area decreased by more than 55%. At the same time, regional economic development exhibits significant differentiation, with the port area maintaining a leading economic output, whereas Dongxing City experienced a temporary decline between 2017 and 2020 due to border trade and the pandemic; (3) Natural disasters show clear east-west differentiation, with floods dominating the eastern region, such as the 2020 Qin River flood which submerged 12,000 hm^2 of farmland, while the western region faces storm surges and chain hazards of mountain floods. Sea level rise and extreme climatic events exacerbate disaster risks. Based on these characteristics, three differentiated estuarine governance pathways are proposed: tourism and leisure-oriented, shipping and trade-oriented, and ecological protection-oriented, providing a scientific basis for integrated coastal zone management, disaster prevention and reduction, and ecological conservation.

Keywords: Spatiotemporal differentiation, Branching coefficient, Estuaries of rivers flowing into the sea, Coastal zone management, Beibu Gulf of Guangxi

0　引言

河口是在海陆交互界面形成的半封闭生态系统[1]，兼具水文调节与生态保育功能。其通过水沙动态平衡塑造地貌特征，具有削减洪峰、抵御风暴潮的作用，并为候鸟及海洋生物提供栖息环境[2]。潮滩区域通过增大纳潮量和提升水体自净能力维系生物多样性，构成高价值的生态屏障[2]。

Guo 等[3]分析长江流域泥沙通量的时空变化，指出三峡大坝等人类活动导致河口泥沙减少，中下游河道冲刷加剧，影响三角洲地貌演变。EL Adnani[4]基于遥感数据（1985—2017 年）分析摩洛哥 Sebou 河口土地利用变化，发现城市化和农业扩张导致森林面积减少，强调需加强生态保护与规划管理。近年来，随着国土空间规划与生态文明建设的深入推进，相关研究热点逐步向陆海统筹管理、生态修复工程评估等应用领域延伸。然而，现有研究多聚焦于国家一级河流，对中小型河流河口的关注仍显不足。

广西北部湾河口海岸是区域向海经济发展的前沿阵地[5]。其河口系统地理区位独特，生态功能显著，既是红树林、珊瑚礁等典型生态系统的栖息地，也是西南地区向海经济实施的重要载体[5]。近 20 年来，在“一带一路”倡议的驱动下，广西北部湾河口区建设用地扩张明显，围填海工程导致自然岸线缩减，叠加极端气候事件频发，河口系统的脆弱性日益凸显[6]。当前研究主要存在两个方面的局限性：其一，对中小型河口多要素耦合机制解析不足，现有研究成果多局限于单要素的孤立研究；其二，缺乏长时间序列（≥ 20 年）的时空对比研究，难以系统地揭示人类活动与自然过程的交互作用对河口地区的复合影响。本文从水文、沉积、水动力、自然灾害、土地利用变化及经济社会发展六个要素维度，深入剖析广西北部湾入海河流河口的时空分异特征，以期为河口海岸资源环境的保护与利用提供科学依据，推动区域协调与可持续发展。

1 研究区域概况

广西北部湾沿海区位于中国沿海南端（20°26′N—22°41′N，107°28′E—109°47′E），由钦州、北海和防城港三市组成。该区域面积约 20 127 km^2[7]，海岸线长约 1 628.6 km[8]。北部湾属于大陆架上的一个浅海湾，入湾典型河流有中国广西的南流江、大风江、钦江、茅岭江、防城河、北仑河[9]。水下地形平坦，全部位于大陆棚内，海域面积约 12.93 万 km^2，平均深度为 46 m，湾口处最大水深不超过 100 m[10]。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源

本文所使用的遥感影像数据均源自地理空间数据云平台；土地利用数据采用由武汉大学杨杰教授和黄昕教授团队基于 Google Earth Engine 平台解译的中国土地覆盖数据集（CLCD）《1985 年至 2023 年中国 30 m 分辨率的逐年土地覆盖数据集》。根据《土地利用现状分类》（GB/T 21010—2017），结合各河口的实际情况，本文将土地利用类型进行重新分类。六大河口的经济社会发展数据均来源于《广西统计年鉴（2004—2024）》。其中港口区 2003—2014 年的经济社会发展数据和各区县 2024 年的人均生产总值数据缺失。

2.2 研究方法

本文主要采用空间分析与时间序列对比相结合的方法。利用 ArcGIS 10.8、ENVI 5.3 进行遥感影像处理、土地分类信息提取。通过对比弯曲系数、分汊系数、展宽系数、年平均径流量及含沙量等形态指标分析河口水文特征。基于 2003 年、2013 年、2023 年三个典型年份的土地利用数据，探究其时空变化趋势。经济社会数据采用趋势分析和比较分析法，揭示其时空分异特征。

3 广西北部湾入海河流河口要素时空分异特征

3.1 水文特征

本文选取弯曲系数、分汊系数、展宽系数、年平均径流量及含沙量等核心指标，对广西北部湾 6 条入海河流进行了系统的水文特征对比分析（图 1）。结果表明，研究区河口水文特征呈现一定的东—西空间分异格局。东部以南流江为代表，表现出较强的水动力活跃性。其喇叭状河口形态体现为 8.99 km 的展宽系数，约为钦江（3.74 km）的 2.4 倍，该形态在一定程度上有利于潮波汇聚与能量增强。在河道蜿蜒度方面，南流江弯曲系数达 3.66，高于 1.3 的弯曲河道判识阈值，暗示其流经区域地形可能较为复杂。值得注意的是，该河口年均径流量达 5.18×10^9 m^3[11]，居全区之首，而年均输沙量仅为 11.8×10^4 t[12]，形成“高径流—低含沙”的组合特征，显示出以冲刷作用为主导的河口动态倾向。西部河流则显现出较为多元的水文组合特征。北仑河发育有 7 条分汊河道，分汊系数为 7，高于钦江，反映其河口区沉积动力格局可能较为复杂，具有多通道输运的潜力。大风江年均输沙量达 3.6×10^5 t[13]，是区域泥沙输运量较大的河流之一，其较高的泥沙输入指示河口可能处于相对活跃的淤积状态。茅岭江与防城河河道形态相对顺直，弯曲系数均为 1.24，接近平直河道的判别标准。钦江年均径流量为 1.00×10^9 m^3[11]，在全区中相对较低，显示其在水文系统中可能处于相对弱势的地位，径流动力有限，可能对其物质向海输送能力形成一定制约。

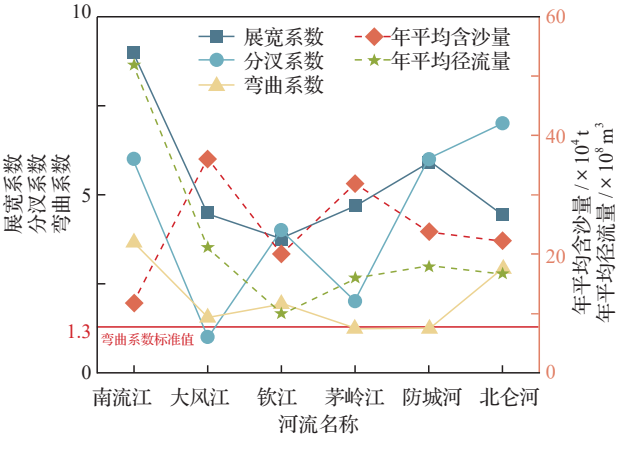

图 1 广西北部湾典型入海河流河口水文特征对比

Fig.1 Comparison of hydrological characteristics of estuaries of typical rivers flowing into the sea in the Beibu Gulf, Guangxi

3.2　沉积特征

对广西北部湾 6 个河口沉积特征的分析，揭示了其受水文与水动力条件控制的显著空间异质性，构成了海岸带生态环境与资源利用的物质基础。具体而言，各河口沉积物类型呈现出明显的空间分异格局。东部强径流作用的南流江，其河口及邻近海域沉积物中包含 5 种含砾沉积物[14]，类型组成丰富，这与其高能水动力环境相匹配，强劲的水流有能力搬运和沉积较粗的颗粒物，同时也指示了多元的物源供给。大风江作为区域主要输沙通道，河口表层沉积物以粉砂为主[15]，直接印证了其高含沙量的水文属性，细颗粒的粉砂在河口流速减缓区发生大量沉降。防城河河口沉积组合最为复杂，细砾、粉砂与黏土共存[16]，呈现多模态粒度分布特征。北仑河河口具有“上细下粗”的典型沉积结构，表层黏土覆盖于细—中砂层之上[17]，下部砂质单元代表强动力条件下的底质组成，上部黏土层则指示静水环境的缓慢沉降过程，是海陆交互作用下的典型沉积序列。

3.3　水动力特征

研究区潮汐类型具有复杂的空间分异特征。防城河口与北仑河口表现为正规全日潮[18-19]，南流江口和大风江口则属于不正规全日潮[20-21]，虽以全日潮为主，但受其他分潮的影响，潮汐过程呈现出一定的不规则性。最为特殊的是钦江与茅岭江共同出海形成的河口区，成为区域内唯一的不正规混合全日潮类型区[22]。潮差是衡量潮汐动力强弱的关键指标。

潮差作为反映潮汐动力的重要参数，在不同河口之间存在一定的梯度差异（表 1）。从平均潮差来看，整体上呈现从北仑河口（3.24 m[19]）向大风江口（2 ～ 3 m[23]）、南流江口（2.5 m[24]）、防城河口（2.25 m[18]）、茅岭江口（1.11 m[25]）至钦江口（0.97 ～ 1.01 m[26]）逐渐递减的趋势。在最大潮差方面，大风江口达到 6.41 m[23]，为全区最高；防城河口与北仑河口的最大潮差也超过 4.9 m[18-19]；相对而言，钦江口的最大潮差仅为 2.20 m[26]，显示出较弱的潮汐动力环境。

表 1　广西北部湾典型入海河流河口动力特征

Table 1　Dynamic characteristics of estuaries of typical rivers flowing into the sea in the Beibu Gulf，Guangxi

河流名称	潮汐类型	最大潮差 /m	平均潮差 /m
南流江	不正规全日潮	—	2.5
大风江	不正规全日潮	6.41	2 ～ 3
钦江	不正规混合全日潮	2.21（涨潮） 2.20（落潮）	0.97（涨潮） 1.01（落潮）
茅岭江	不正规混合全日潮	—	1.11
防城河	正规全日潮	4.93	2.25
北仑河	正规全日潮	5.05	3.24

注：南流江口和茅岭江口的“最大潮差”数据因监测条件不足，极端潮差缺失。

3.4　土地利用变化特征

结合《土地利用现状分类》（GB/T 21010—2017）及许珊珊等[11]提出的河口分类体系，构建了涵盖水域、林地、农田、草地、建设用地和未利用土地六大类的地类划分系统。

从时间序列来看，2003—2013 年，研究区土地利用变化较为显著，主要表现为水域面积的较快缩减与建设用地范围的持续扩张；2013—2023 年，在生态文明建设理念逐步落实的背景下，部分河口区域的林地面积有所恢复，生态呈现出一定的改善迹象。然而，受长期发展模式的影响及部分区域围填海活动的持续影响，水域面积的萎缩趋势尚未得到完全遏制，建设用地的扩张仍在继续，在一定程度上反映出区域在发展过程中经济开发与生态保护之间仍需进一步协调。

遥感影像分析表明，研究区土地利用结构发生系统性转变，总体呈现“三增两减一稳定”的格局：建设用地与林地显著扩张，部分未利用地增加；水域与农田面积持续萎缩；草地占比低且基本稳定。水域空间的持续萎缩最为突出，所有河口区均呈下降趋势，其中钦州湾因围填海强度大，水域减少量显著，导致河口自然水边界的结构性改变与生态调蓄功能减弱。相反，建设用地全面扩张，钦州湾与防城河口最为明显。林地与农田变化呈现区

域分异。东部南流江与大风江河口林地恢复显著，体现了生态工程的积极成效；西部防城河口林地持续退化，与土地开发压力密切相关。农田面积普遍缩减，钦州湾尤为剧烈，由 61 194.15 hm^2 减少至 27 470.17 hm^2，降幅超过 55%，凸显了区域产业结构由农业主导向第二产业和第三产业转型的整体趋势（图 2）。

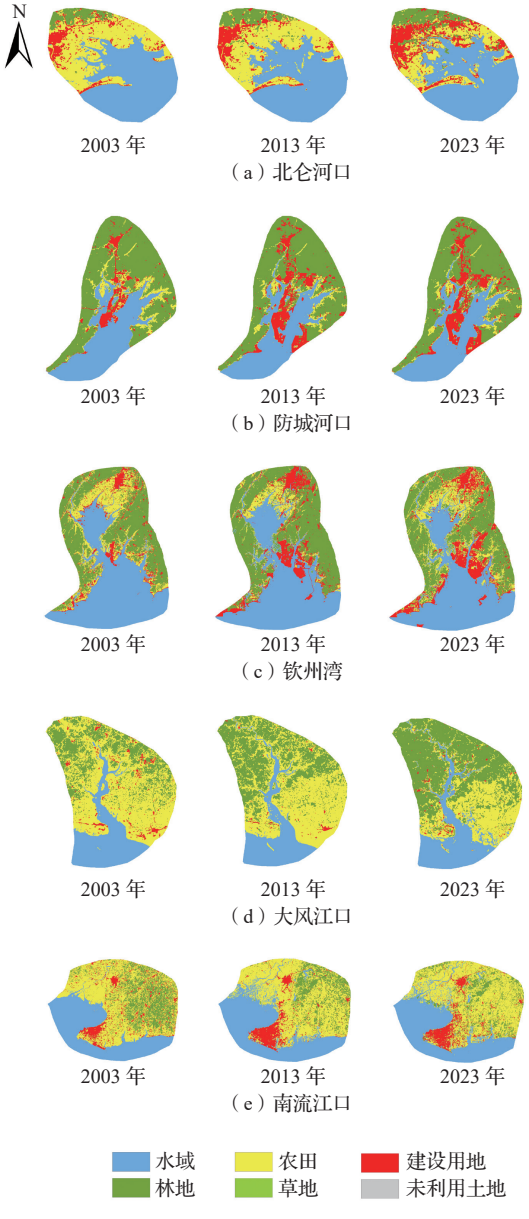

图 2 2003 年、2013 年和 2023 年广西北部湾典型入海河流河口土地利用变化

Fig.2 Land use changes of estuaries of typical rivers flowing into the sea in the Beibu Gulf, Guangxi in 2003, 2013 and 2023

3.5 自然灾害特征

时间上，全域极端气候事件发生频率与强度呈显著上升趋势。北海银滩海岸线以年均 1.5 m 的速率蚀退[27]，反映在海平面上升与波浪动力增强背景下海岸侵蚀持续加剧；2023 年，台风“海葵”在南流江引发超 20 年一遇的洪水[28]，进一步印证了极端水文气象事件对河口的威胁正在加剧。这一趋势与全球气候变化背景下极端事件增多的宏观态势相一致，凸显了区域灾害风险进一步加剧的潜在可能性。

空间上，研究区自然灾害类型具有明确的东—西分异特征。东部河流（南流江、大风江、钦江）流域地形平缓，河道比降较小，主要面临洪水内涝与农田淹没风险。例如，2020 年 6 月，钦江流域持续强降雨导致钦南区 1.2 万 hm^2 的农田受淹，造成直接经济损失约 3.5 亿元[29]，揭示出该区域在极端降雨条件下排水能力不足与农业资产暴露度高的系统性弱点。西部河流（茅岭江、防城河、北仑河）流经十万大山余脉，坡陡流急，且直接面向开阔海域，灾害类型以山洪、泥石流与台风风暴潮等复合型事件为主。2014 年，超强台风“威马逊”期间，北仑河口出现 2.8 m 的风暴增水[30]，防城河口咸潮上溯距离达 15 km[25]，形成“风—暴—潮—浪—盐”的链式灾害，不仅对基础设施造成严重破坏，也对滨海湿地生态结构与区域供水安全产生了深远影响（表 2）。

表 2 广西北部湾入海河流自然灾害特征

Table 2 Natural disaster characteristics of rivers flowing into the sea in the Beibu Gulf, Guangxi

区域划分	代表河流	主要灾害类型	典型事件及影响
东部河流	南流江 大风江 钦江	洪水内涝 农田淹没	2020 年 6 月，钦江流域连续强降雨导致钦南区农田淹没面积达 1.2 万 hm^2，经济损失约 3.5 亿元
西部河流	茅岭江 防城河 北仑河	山洪 泥石流 风暴潮	山洪—泥石流灾害链频发，台风风暴潮影响如 2014 年“威马逊”台风导致北仑河口增水 2.8 m 和防城河口咸潮上溯距离达 15 km
时间动态	全域	极端天气 海平面上升	北海银滩岸线年均蚀退 1.5 m，2023 年“海葵”台风引发南流江超 20 年一遇的洪水

3.6　经济社会发展特征

数据显示，研究区的经济发展呈现出显著的时空分异性，并与河口环境演变形成了复杂的互动关系。时间上，近 20 年来区域经济总体保持增长态势，但具有明显的波动性与阶段性。钦南区和合浦县增长显著，反映出环钦州湾区域作为北部湾经济区核心地带的快速发展态势；港口区作为区域经济中心，生产总值持续领先。值得注意的是，合浦县的人均生产总值呈现持续稳步上升的态势，并在 2020 年前后与东兴市、防城区等曾出现峰值后回落的区域实现了数据交叉，甚至实现反超（图 3）。然而，经济发展普遍受全球经济波动、国家政策调整与新冠疫情的多重影响[31-32]。东兴市与防城区在 2017—2020 年经历阶段性衰退，人均生产总值同步下滑。东兴市经济回落主要源于边境贸易波动、旅游业受阻与固定资产投资放缓的叠加影响[33-36]；防城区则面临产业转型滞后、外部环境冲击与劳动力外流的复合压力。相比之下，合浦县的经济发展显示出更强的稳定性，其人均生产总值的持续增长，可能得益于产业结构相对多元、对边境贸易和旅游业依赖度较低，以及承接部分临港产业转移和特色农业、海洋经济的稳步发展。2019 年后，新冠疫情暴发进一步加剧了边境城市的经济脆弱性。港口区与钦南区虽总体规模占优，也在特定年份因产业结构升级的转型压力、财政收支变动与疫情等因素的影响[30,39]，出现增长放缓或人均生产总值回落。

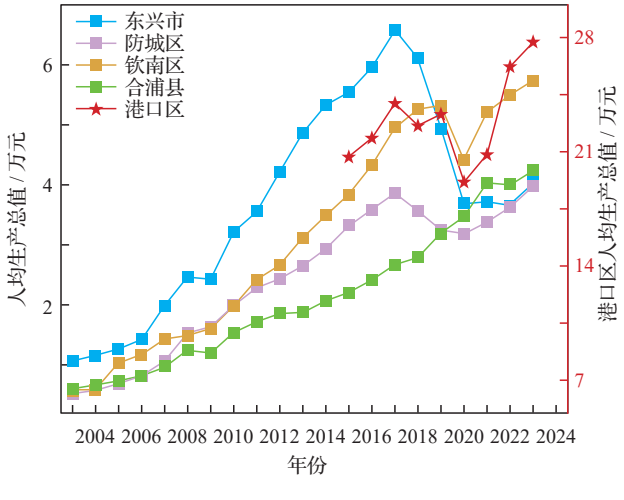

图 3　2003—2023 年广西北部湾典型入海河流入海口城市人均生产总值变化

Fig.3　Changes in per capita GDP of cities at the estuaries of typical rivers flowing into the sea in the Beibu Gulf, Guangxi from 2003 to 2023

从空间格局来看，研究区域经济发展水平存在显著的空间分异。港口区作为区域经济增长极，其经济总量和人均生产总值持续领先；相比之下，合浦县作为县级区域，经济发展相对滞后。然而，合浦县人均生产总值的持续追赶并实现与部分区县的交叉，表明区域内部经济发展格局正在发生微妙的动态调整。尽管近 20 年来区域经济空间格局有所调整，但整体空间结构未发生根本性改变，反映出区域经济发展的路径依赖性。

4　讨论

4.1　自然因素的影响

河口自然属性的分异是地质背景、气候波动与海洋动力协同作用的结果，其影响具有基础性和长期性。东部南流江的“高径流—低含沙”特征与长江口的“高径流—高含沙”特征形成鲜明对比。长江口流域面积大、侵蚀作用强烈，输沙量高达 4.7×10^{8} t/a[3]，而南流江流域喀斯特地貌广布，其碳酸盐岩占比超过 60%，岩层抗侵蚀能力强，导致输沙量显著偏低，这是决定河口以冲刷作用为主还是以淤积作用为主的关键地质背景。大风江作为区域主要输沙通道，其输沙量达 3.6×10^{5} t/a[13]，粉砂质沉积物分布广泛，占比达 62%，其沉积机制与湄公河口“径流—潮流共同作用下的细颗粒沉积”机制相似，但因北部湾属于半封闭海湾，洋流动力较弱，泥沙扩散范围受限，从而在近岸形成明显的淤积带[19]。

北部湾海平面上升速率达 3.2 mm/a[27]，该数据是基于 1993—2022 年的卫星测高与沿岸验潮站观测资料综合分析得出的，与联合国政府间气候变化专门委员会第 5 次评估报告中发布的全球平均海平面上升速率［约（3.2 ± 0.4）mm/a］基本一致，但在区域尺度上受季风、洋流及局部地壳沉降等因素影响仍存在一定差异。东部南流江在 2023 年“海葵”台风期间遭遇超 20 年一遇的洪水，洪峰流量达 3 200 m^3/s，

较历史均值增幅达 45%，印证了气候变化对径流极端性的强化作用[28]；西部北仑河 2014 年“威马逊”台风期间出现 2.8 m 风暴增水[30]，这与全球热带气旋强度增加的趋势一致，但因十万大山地形抬升效应，该区域风暴潮—山洪链式灾害的耦合风险高于较平坦海岸。海平面上升抬高了区域基准面，增强了潮汐动力，加剧了对岸滩的侵蚀，并使咸潮上溯范围进一步向内陆延伸，如防城河口咸潮上溯距离达 15 km[25]，这对河口淡水生态系统、农田灌溉及城乡供水安全构成了长期威胁。

4.2 人类活动的影响

近 20 年来，人类活动已成为驱动河口系统演变的重要影响因素，主要表现在城镇化、围填海及水利工程等方面。

快速城镇化与土地利用转型在流域尺度上影响了河口系统。在“向海经济”战略推动下，钦州港工业区建设用地增长 112%[11]，与东兴边境地带实施的生态保护政策形成鲜明对比。这导致钦江—茅岭江流域农田面积减少，而北仑河流域林地保存相对完整，在一定程度上反映出东、西部河口区域在土地利用趋势上的差异。此外，沿海地区的围填海活动也为河口自然岸线和水域空间带来了一定的改变，进而影响了区域的水动力与沉积环境 。

人类活动对河口系统的影响不仅体现在土地利用层面，水利工程与流域调控同样值得关注。南流江上游水库群总库容为 1.2×10^9 m^3，拦截泥沙导致河口输沙量较 20 世纪 80 年代下降 38%[14]，该过程与密西西比河因大坝建设引发的河口侵蚀过程相似，但南流江因平均潮差为 2.5 m[24]，潮汐动力更强，侵蚀速率显著高于密西西比河三角洲 。同时，西部防城区城镇化率提升导致不透水面积增加 42%，径流系数从 0.45 上升至 0.63[25]，加剧了山洪—风暴潮的复合风险。此外，西部陆海新通道骨干工程——平陆运河的建设也将对相关河口的物质输运与水沙过程产生重要影响。

4.3 可持续发展建议

为实现广西北部湾海岸带的可持续发展，在管理策略方面，应采取基于河口类型与区域问题的差异化治理路径。

依据“生态优先、文化传承、产业协调”的核心原则，结合经济社会发展及国土空间规划目标，将六大河口划分为 3 类发展导向：旅游休闲型河口（南流江口）、航运与贸易型河口（钦江口、茅岭江口、防城河口）与生态保护型河口（大风江口、北仑河口）。针对不同类型河口，实施差异化发展模式。

旅游休闲型河口推行“生态旅游与文化遗址保护相结合发展模式”，重点整合汉代海丝文化遗址与滨海生态资源，构建“生态—文化”复合红线，强化旅游开发中的遗址保护与生态监管；航运与贸易型河口实施“临港经济与生态协调发展模式”，在港口集聚区划定产业准入绿线，严格管控陆源与船舶污染，推广清洁生产技术，推动红树林修复与海岸生态廊道建设，实现开发与保护协同；生态保护型河口落实“生态保护与修复优先发展模式”，聚焦红树林、珍稀物种栖息地保护与跨境生态共治，建立生态阈值响应与联合监测机制，限制高强度开发，促进生态服务功能升级。

5 结论

本文通过对 2003—2023 年广西北部湾六大典型入海河口的系统分析，揭示其时空分异特征及驱动因素，主要结论如下。

（1）河口自然特征呈现出显著的空间分异性。东部南流江展宽系数达 8.99 km，弯曲系数为 3.66，年均径流量为 5.18×10^9 m^3，呈现出“高径流—低含沙”的特征；西部北仑河分汊系数为 7，沉积类型复杂，体现出东、西部河口在水文、沉积与动力方面的显著差异。

（2）近 20 年来，土地利用类型面积变化呈现出“水域缩减—建设扩张”趋势，但时空分异显著。钦州湾水域面积减少最为严重，建设用地扩张了 112%；农田面积萎缩，钦州湾农田面积从 61 194.15 hm^2 减少至 27 470.17 hm^2；南流江与大风江河口林地有所恢复，防城河口则持续退化。土地利用变化体现了区域发展模式与生态保护政策方面的区域差异。

（3）自然灾害方面呈现显著的区域性和时间动态特征，东部河流主要受洪涝灾害影响，西部河流

则面临山洪、泥石流和风暴潮的多重威胁。极端天气事件的增加进一步加剧了这些灾害的风险，亟须加强区域灾害监测和综合防灾减灾策略。

（4）经济与社会指标整体上升但波动性明显。钦南区生产总值增速显著高于东兴市，体现了临港工业与边境贸易的驱动差异；港口区 2017—2018 年生产总值下降与产业结构单一化导致的抗风险能力不足密切相关。经济发展与河口环境演变之间形成复杂互动，需在发展中统筹生态安全。

综上所述，未来广西北部湾海岸带的管理与规划，必须充分考虑不同河口的自然禀赋、演化阶段及所承受的人类活动压力，实施分类河口差异化管控与生态修复策略，以实现区域经济发展与生态安全之间的可持续平衡。

参考文献（References）：

[1] 时玉涛，温海燕，乔光建．人类活动对滦河口湿地生态环境影响分析[J]．南水北调与水利科技，2011，9(3)：124-128．
SHI Yutao，WEN Haiyan，QIAO Guangjian．An analysis of impact of human activities on wetland ecological environment in Luanhe River Estuary[J]．South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology，2011，9(3)：124-128．

[2] 陈映，王世俊，何用．广东中小河流河口特征与分类治理策略[J]．人民珠江，2022，43(12)：46-54．
CHEN Ying，WANG Shijun，HE Yong．Characteristics and classified governance strategies of medium and small estuaries in Guangdong[J]．Pearl River，2022，43(12)：46-54．

[3] GUO L，SU N，TOWNEND I，et al．From the headwater to the delta：a synthesis of the basin-scale sediment load regime in the Changjiang River[J]．Earth-Science Reviews，2019，197：102900．

[4] EL ADNANI A．Spatio-temporal dynamics and evolution of land use land cover using remote sensing and GIS in Sebou Estuary，Morocco[J]．Journal of Geographic Information System，2019，11(5)：551-566．

[5] 黎树式．广西北部湾河口海岸研究[M]．北京：科学出版社，2023．
LI Shushi．A study on the estuaries and coasts of the Beibu Gulf，Guangxi[M]．Beijing：Science Press，2023．

[6] 毛蒋兴，蒋丽娟，周小玲，等．广西：一条海岸线的半个世纪[J]．地图，2020(3)：14-45．
MAO Jiangxing，JIANG Lijuan，ZHOU Xiaoling，et al．Guangxi：half a century of a coastline[J]．Map，2020(3)：14-45．

[7] 周姣娣，鲁栋梁，许玉萍，等．基于 InVEST 和 GIS 模型的广西北部湾沿海地区碳储量时空演变研究[J]．海洋环境科学，2024，43(5)：715-722．
ZHOU Jiaodi，LU Dongliang，XU Yuping，et al．Study on carbon storage space-time evolution in the coastal area of Guangxi Bei Gulf based on InVEST and GIS model[J]．Marine Environmental Science，2024，43(5)：715-722．

[8] 广西壮族自治区人民政府．广西壮族自治区海洋功能区划（2011—2020 年）[Z]．2012．
People’s Government of Guangxi Zhuang Autonomous Region．Marine functional zoning of Guangxi Zhuang Autonomous Region(2011—2020)[Z]．2012．

[9] 侍茂崇，陈波，丁扬，等．风对北部湾入海径流扩散影响的研究[J]．广西科学，2016，23(6)：485-491．
SHI Maochong，CHEN Bo，DING Yang，et al．Wind effects on spread of runoffs in Beibu Bay[J]．Guangxi Sciences，2016，23(6)：485-491．

[10] 周浩郎，葛文标．北部湾石珊瑚多样性[J]．广西科学院学报，2024，40(3)：310-330．
ZHOU Haolang，GE Wenbiao．Diversity of *Scleractinian corals* in the Beibu Gulf[J]．Journal of Guangxi Academy of Sciences，2024，40(3)：310-330．

[11] 许珊珊，杨夏玲，黎树式，等．北部湾典型入海河流水沙变化及其对土地利用景观格局的响应[J]．水土保持通报，2024，44(4)：298-308．
XU Shanshan，YANG Xialing，LI Shushi，et al．Changes of water and sediment in typical rivers entering sea in Beibu Gulf and their response to landuse landscape pattern[J]．Bulletin of Soiland Water Conservation，2024，44(4)：298-308．

[12] 中国海湾志编纂委员会．中国海湾志·第十四分册·重要河口[M]．北京：海洋出版社，1998．
Editorial Committee of China Coast Record．China coast record：volume 14，important estuaries[M]．Beijing：China Ocean Press，1998．

[13] 罗亚飞，黄海军，严立文，等. 基于遥感方法的大风江口悬浮体时空分布及扩散特征研究[J]. 海洋湖沼通报，2015(3)：14-20.
LUO Yafei，HUANG Haijun，YAN Liwen，et al. Distribution and difference of suspended matters based on remote sensing in the Dafengjiang estuary[J]. Transactions of Oceanology and Limnology，2015(3)：14-20.

[14] 林镇坤. 南流江河口水下三角洲沉积动力特征初探[D]. 厦门：自然资源部第三海洋研究所，2019.
LIN Zhenkun. Preliminary study on sediment dynamic of the subaqueous delta in the Nanliujiang estuary[D]. Xiamen：Third Institute of Oceanography，Ministry of Natural Resources，2019.

[15] 徐程，杨斌，朱雪菁，等. 大风江口海域沉积物酸可挥发性硫化物、重金属分布及风险评价[J]. 环境科学研究，2020，33(6)：1530-1538.
XU Cheng，YANG Bin，ZHU Xuejing，et al. Distribution and risk assessment of acid volatile sulfide and heavy metals in sediments of Dafengjiang River estuary[J]. Research of Environmental Sciences，2020，33(6)：1530-1538.

[16] 梁文，李智，范航清，等. 防城港湾红树林表层沉积物粒度分形特征及与环境因子的相关性[J]. 应用海洋学学报，2013，32(2)：184-192.
LIANG Wen，LI Zhi，FAN Hangqing，et al. Fractal characteristics and correlation with environmental factor on the surface sediments in mangrove areas of Fangchenggang Bay[J]. Journal of Applied Oceanography，2013，32(2)：184-192.

[17] 王恒波. 北仑河口钻孔沉积物特征及其沉积环境[D]. 厦门：国家海洋局第三海洋研究所，2009.
WANG Hengbo. The characteristic of core sedimentary and the sediment environment of Beilun Estuary[D]. Xiamen：Third Institute of Oceanography，State Oceanic Administration，2009.

[18] 范航清，王欣，何斌源，等. 人工生境创立与红树林重建[M]. 北京：中国林业出版社，2014.
FAN Hangqing，WANG Xin，HE Binyuan，et al. Artificial habitat creation and mangrove restoration[M]. Beijing：China Forestry Publishing House，2014.

[19] 陈逸航，高劲松. 大风江典型工程流场变化特征及悬浮泥沙扩散数值模拟[J]. 广西科学院学报，2022，38(4)：420-428.
CHEN Yihang，GAO Jinsong. Numerical simulation of current characteristics and suspended sediment diffusion of typical engineering in the Dafengjiang River[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences，2022，38(4)：420-428.

[20] 何斌源，赖廷和，陈剑锋，等. 两种红树植物白骨壤 (*Avicennia marina*) 和桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 的耐淹性[J]. 生态学报，2007(3)：1130-1138.
HE Binyuan，LAI Tinghe，CHEN Jianfeng，et al. Studies of the tolerance of *Avicennia marina* and *Aegiceras comiculatum* to sea water immersion in Guangxi China[J]. Acta Ecologica Sinica，2007(3)：1130-1138.

[21] 罗方强. 中华白海豚饵料鱼资源变化与栖息地选择关系研究[D]. 钦州：北部湾大学，2024.
LUO Fangqiang. Study on the relationship between the change of feeding fish resources and habitat selection of Indo-Pacific humpback dolphin(Sousa chinensis)[D]. Qinzhou：Beibu Gulf University，2024.

[22] 王日明，梁喜幸，周晓妍，等. 钦江河口潮滩红树林群落空间分布[J]. 遥感学报，2022，26(6)：1143-1154.
WANG Riming，LIANG Xixing，ZHOU Xiaoyan，et al. Spatial distribution of mangrove community in tidal flats of the Qinjiang Estuary[J]. National Remote Sensing Bulletin，2022，26(6)：1143-1154.

[23] 庞国涛，阎琨，李伟. 广西三娘湾海域表层沉积物多环芳烃特征及风险评价[J]. 中国地质调查，2021，8(5)：95-100.
PANG Guotao，YAN Kun，LI Wei. Characteristics and risk assessment of hydrocarbons in surface of Sanniang Bay in Guangxi Province[J]. Geological Survey of China，2021，8(5)：95-100.

[24] 杨干然，李春初，罗章仁，等. 海岸动力地貌学研究及其在华南港口建设中的应用[M]. 广州：中山大学出版社，1995.
YANG Ganran，LI Chunchu，LUO Zhangren，et al. Research on coastal dynamic geomorphology and its application in port construction of south China[M]. Guangzhou：Sun Yat-sen University Press，1995.

[25] 陈春燕. 基于多水库联合调节的防城河可供水量计算模型研究[C] // 中国水利学会. 中国水利学会 2016 学术年会论文集（上册）. 水利部珠江水利委员会水文局，2016：208-214.
CHEN Chunyan. A study on water supply calculation model of Fangcheng River based on joint regulation of multiple reservoirs[C]// Chinese Hydraulic Engineering Society. Proceedings of 2016 Academic Annual Meeting of Chinese Hydraulic Engineering Society(Vol.1). Hydrological Bureau of Pearl River Water Resources Commission，Ministry of Water Resources，2016：208-214.

[26] 马进荣，程梦妍，廖文凯，等. 广西茅岭江入海典型污染物通量估算方法[J]. 广西科学，2019，26(3)：335-340.
MA Jinrong，CHENG Mengyan，LIAO Wenkai，et al. Method of estimating the typical pollutant flux from Maoling River to

Maowei Sea in Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(3): 335-340.

[27] 黄鹄，戴志军，盛凯. 广西北海银滩侵蚀及其与海平面上升的关系[J]. 台湾海峡，2011，30(2)：275-279.
HUANG Hu, DAI Zhijun, SHENG Kai. Coastal erosion and associated response to the sea-level rise of Yintan, Beihai, Guangxi Province[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(2): 275-279.

[28] LIU X, CHEN Y, ZHANG Z. Extreme weather events and their impacts on coastal regions: a case study of the Beibu Gulf[J]. Climate Change Impacts, 2023, 12(2): 89-101.

[29] 钦州市统计局. 钦州市 2021 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 2021.
Qinzhou Municipal Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of Qinzhou City in 2021[R]. 2021.

[30] 广西壮族自治区防汛抗旱指挥部. 2014 年广西防汛抗旱工作总结报告[R]. 2014.
Guangxi Zhuang Autonomous Region Flood Control and Drought Relief Headquarters. Summary report of flood control and drought relief work in Guangxi in 2014[R]. 2014.

[31] 华经产业研究院. 2016—2020 年防城港市地区生产总值、产业结构及人均 GDP 统计分析[R]. 2020.
Huajing Industry Research Institute. Statistical analysis of regional GDP, industrial structure and per capita GDP of Fangchenggang City from 2016 to 2020[R]. 2020.

[32] 防城港市港口区人民政府. 防城港市港口区 2020 年人民政府工作报告[R]. 2020.
People's Government of Gangkou District, Fangchenggang City. Government work report of Gangkou District, Fangchenggang City in 2020[R]. 2020.

[33] 国家统计局广西调查总队. 2017 年广西壮族自治区国民经济和社会发展统计公报[R]. 2018.
Guangxi Survey Corps of National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of national economic and social development of Guangxi Zhuang Autonomous Region in 2017[R]. 2018.

[34] 广西壮族自治区环境保护厅. 2017 年广西壮族自治区环境状况公报[R]. 2018.
Department of Environmental Protection of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Environmental status bulletin of Guangxi Zhuang Autonomous Region in 2017[R]. 2018.

[35] 广西壮族自治区人民政府. 广西生育出现小高峰人口总量稳定增加[R]. 2018.
People's Government of Guangxi Zhuang Autonomous Region. A small birth peak emerges in Guangxi with a steady increase in total population[R]. 2018.

[36] 广西壮族自治区人民政府. 2017 年广西实际利用外资情况分析[R]. 2018.
People's Government of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Analysis of the actual utilization of foreign capital in Guangxi in 2017[R]. 2018.

[37] 防城港市人民政府. 2017 年防城港市国民经济和社会发展统计公报[R]. 2018.
People's Government of Fangchenggang City. Statistical bulletin of national economic and social development of Fangchenggang City in 2017[R]. 2018.

[38] 合浦县人民政府. 合浦县国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要[Z]. 2024.
People's Government of Hepu County. Outline of the 14th five-year plan and the long-range objectives through the year 2035 for national economic and social development of Hepu County[Z]. 2024.

[39] ZHANG Y, WANG H, LIU X. Flood risk assessment in coastal areas: a case study of Qinjiang River Basin[J]. Journal of Hydrology, 2021, 45(3): 123-134.

[40] OGSTON A S, ALLISON M A, MULLARNEY J C, et al. Sediment- and hydro-dynamics of the Mekong Delta: from tidal river to continental shelf[J]. Continental Shelf Research: A Companion Journal to Deep-Sea Research and Progress in Oceanography, 2017, 147: 1-6.

[41] IPCC Working Group I. Climate change 2013: the physical science basis-conclusions[J]. Bulletin fur angewandte Geologie, 2013, 18(2): 5-19.

[42] 陈波，董德信，高劲松，等. 广西围填海工程建设对水动力的影响与评估体系研究[Z]. 2016.
CHEN Bo, DONG Dexin, GAO Jinsong, et al. Impact of sea reclamation projects in Guangxi on hydrodynamics and research on the assessment system[Z]. 2016.

[43] DAY J W, BOESCH D F, CLAIRAIN E J, et al. Restoration of the Mississippi delta: lessons from hurricanes Katrina and Rita[J]. Science, 2007, 315(5819): 1679-1684.

[44] MICHAEL D. BLUM, HARRY H. ROBERTS. Drowning of the Mississippi delta due to insufficient sediment supply and global sea-level rise[J]. Nature Geoscience, 2009, 2(7): 488-491.